

北京中低速磁浮交通示范线(S1线)大悬臂钢拱桥顶推施工研究

张亚丽¹ 张雷¹ 李镭²

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 300308, 天津; 2. 中国中铁六局集团有限公司, 100036, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 北京中低速磁浮交通示范线(S1线), 采用 84 m 钢拱桥跨阜石路高架, 该桥钢结构为世界低速磁浮线中跨度最大的钢结构。受复杂地形限制, 采用步履式顶推施工, 顶推条件苛刻; 顶推行程长 365 m, 顶推平面线路为圆曲线、缓和曲线, 立面为 37‰、-41‰的纵坡; 前端最大悬臂 63 m, 后端最大悬臂 48 m。设计了一种新型的 84 m 钢拱桥的结构形式, 通过方案比选分析, 确定了和 33 m 钢梁临时焊接, 加设前后导梁、临时索塔的最优顶推方案, 并进行了详细的检算; 提出了复杂条件下步履式顶推的一系列保障措施, 有效解决了钢拱桥大悬臂顶推受力复杂、变形大的问题。

关键词 中低速磁浮; 钢拱桥; 步履式顶推; 大悬臂

中图分类号 U237

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.023

Research on Large Cantilever Steel Arch Bridge Incremental Launching Construction of Beijing Medium and Low Speed Maglev Transit Demonstration Line (S1)

ZHANG Yali, ZHANG Lei, LI Lei

Abstract Beijing medium and low speed maglev transit demonstration line (S1), uses 84 m steel arch bridge across Fushi Road viaduct, the bridge steel structure has the world's largest span among steel structures of medium and low speed maglev line. Restricted by complex terrain, the walking incremental launching construction is adopted, and the incremental launching conditions are harsh. The length of the incremental launching is 365 m. The pushing plane line is circular curve and easement curve, and the elevation is longitudinal slope of 37‰, -41‰. The maximum front-end cantilever is 63 m, and the maximum cantilever at the rear end is 48 m. A new structure form of 84 m steel arch bridge is designed, through scheme comparison and selection analysis, the optimal pushing scheme of temporary welding with 33 m steel beam, adding front and rear guide beams and temporary cable tower is determined, with a detailed verification calculation. A series of supporting measures for walking incremental launching construc-

tion under complex conditions are put forward, which effectively solve the problems of complex force and large deformation of large cantilever pushing of steel arch bridge.

Key words medium and low speed maglev; steel arch bridge; walking incremental launching; large cantilever

First-author's address China Railway Design Corporation, 300308, Tianjin, China

1 北京 S1 线工程概况

北京市中低速磁浮交通示范线(S1线)西起门头沟石厂站,东至石景山区苹果园站,正线为双线,全长 10.21 km,主要支承结构为桥梁。S1 线于 2011 年开工建设,2017 通车运营,目前还剩余 1 站 2 区间在建。S1 线为我国最早开始设计并开工建设的中低速磁浮运营线路,也是世界上继日本丘陵线、韩国仁川机场线、长沙磁浮快线后,第 4 条运营的中低速磁浮线路。

中低速磁浮线路具有节能、环保、安全性高、噪声小、转弯半径小、爬坡能力高等特性。中低速磁浮交通系统要求其承载结构刚度大、变形小,这决定了其承载结构的优先选择是高架桥梁。中低速磁浮交通系统由悬浮系统、直线电机驱动系统、测速定位系统组成,在轨道梁上设轨排、F 轨、接触轨等,保证车辆平稳可靠悬浮、有效驱动与制动。F 轨轨顶到梁顶 1.4 m,伸缩节伸缩量为 10~20 mm,最大组合伸缩量为 40 mm。为保证轨排的标准,要求桥梁跨度一般为 6 m 的整数倍,且最大温度跨度受限。

S1 线位于北京城区,地形复杂,节点大跨桥梁较多,因此创新采用“梁上梁”结构,即轨道梁上设置承轨梁;受模数布跨和伸缩节调节量的影响,标准跨度采用 24 m 和 30 m,温度钢结构跨度最大采用 84 m,混凝土结构跨度最大采用 124 m。在既有

的国内外中低速磁浮桥梁中,S1线的这些跨度均为最大的跨度。

S1线跨越地铁6号线、阜石路高架,北临大台铁路,南临大型综合商场,受复杂地形条件所限,只能采用大跨度钢梁,顶推施工。桥梁设计方案为:采用6孔简支钢拱桥和钢梁,孔跨布置为84 m+33 m+66 m+33 m+84 m+33 m(见图1);桥梁施工方案

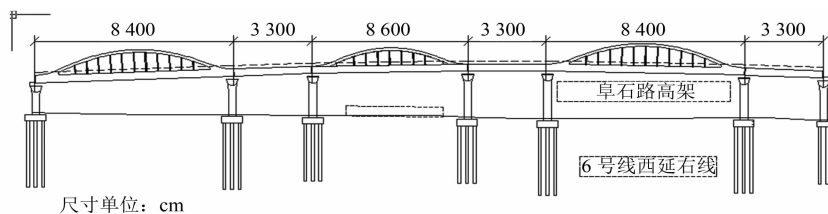


图1 S1线桥跨布置示意图

2 中低速磁浮84 m钢拱桥设计方案

84 m钢拱桥(见图2)系梁属钢格构体系,桥面宽14.37 m,主拱中心距为12.93 m,拱肋矢高为11.15 m,矢跨比为1:6.83。主纵梁、端横梁采用钢箱截面,梁高3.368 m,宽1 032 mm;4道小纵梁、中横梁采用工字形截面,小纵梁高1 000 mm,中横梁高1 800 mm;拱肋由直线、二次抛物线、反向3次曲线组成,采用等截面钢箱拱,截面宽1 464 mm,高1 256 mm,不设横撑;吊杆为刚性吊杆,采用工字钢

为:采用异地拼装、两两焊接、步履式顶推施工方法。跨阜石路高架的84 m钢拱桥顶推行程最长达365 m;顶推行程平面线路为圆曲线、缓和曲线平面线路,曲线半径为1 500 m;立面线路坡度先为37‰后为-41‰,是先升后降大纵坡;跨阜石路高架的悬臂最大,前端达63 m,后端为48 m。由此可知,S1线的设计施工难度较大。

截面,高1 400 mm,宽400 mm,腹板上每隔2.1 m设一个1 200 mm×600 mm镂空孔;主纵梁下部设X型平纵联,采用工字形截面,高600 mm,宽400 mm;钢筋混凝土桥面板宽8 030 mm,上浇筑Ⅱ型钢筋混凝土承轨梁,承轨梁高1.4 m。

84 m钢拱桥主要受力构件采用Q345qE钢板,除拱肋、主纵梁箱型截面纵向采用焊接外,其余采用高强螺栓连接。经验算,该钢拱桥的受力、变形、稳定性、动力性能均满足中低速磁浮列车运营要求。

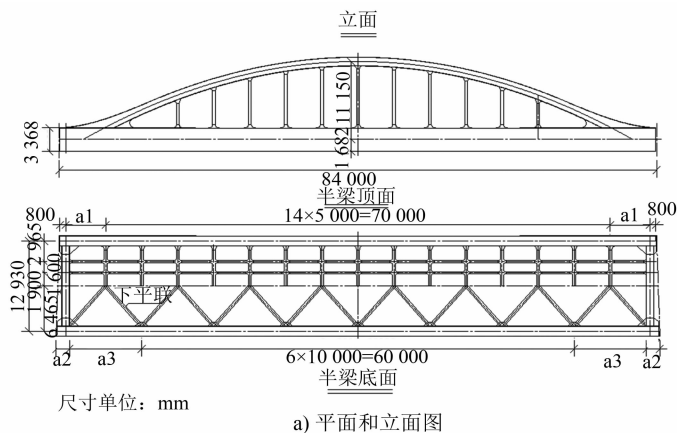
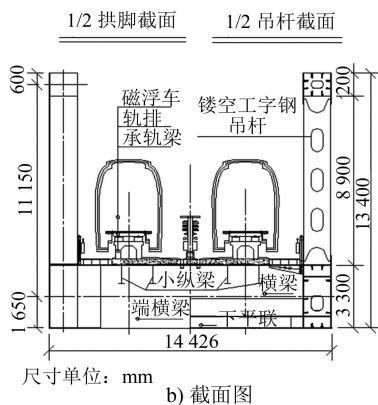


图2 84 m钢拱桥构造示意图



3 大悬臂顶推施工方案设计

84 m钢拱桥顶推前进时,前端跨阜石路高架最大悬臂为63 m,后端跨阜石路辅路最大悬臂为48 m。为便于顶推施工,将84 m钢拱桥和33 m钢格构梁(33 m钢格构梁形式同84 m钢拱桥系梁)临时焊接在一起,但仍不能满足顶推施工要求,因此

需考虑顶推辅助措施。提出了设前导梁、前导梁+索塔、前后导梁+索塔3种措施,并着重对第3种措施进行了计算。

3.1 采用“84 m钢拱桥+33 m钢格构梁+47 m前导梁”顶推

首先按最大悬臂63 m抗倾覆系数2.0考虑,设计前导梁长47 m。顶推至跨阜石路高架悬臂最大

63 m 时的最大正弯矩工况和最大悬臂状态计算结果分别如 3~4 所示。



图 3 84 m 钢拱桥顶推施工时的最大正弯矩工况



图 4 84 m 钢拱桥顶推施工时的最大悬臂状态(最大负弯矩)

此时桥梁的最大压应力为 205 MPa,最大拉应力为 184 MPa,应力接近限值 210 MPa;前导梁悬臂最大下挠为 1 046.3 mm,影响下跨快速路行车,且上到桥墩较困难;后端 84 m 钢拱桥挠度为 62.5 mm,有

可能对拱桥及刚性吊杆产生不可恢复影响。

3.2 采用“84 m 钢拱桥+33 m 钢格构梁+47 m 前导梁+临时索塔”顶推

为改善大悬臂不利状况,拟增设临时索塔(见图 5),在距离 84 m 和 33 m 跨梁缝 5 m 的 33 m 钢梁上,设置索塔,索塔高 24 m,由钢管桁架组成。

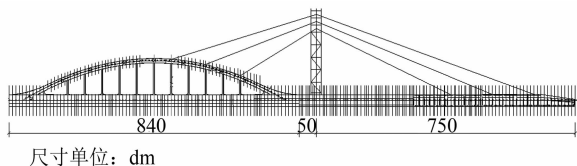


图 5 增设临时索塔示意图

导梁未上临时墩、悬臂最大 63 m 时,前端最大下挠为 201.9 mm。该顶推阶段布置图如图 6 所示。此时导梁前端最大挠度如图 7 所示。

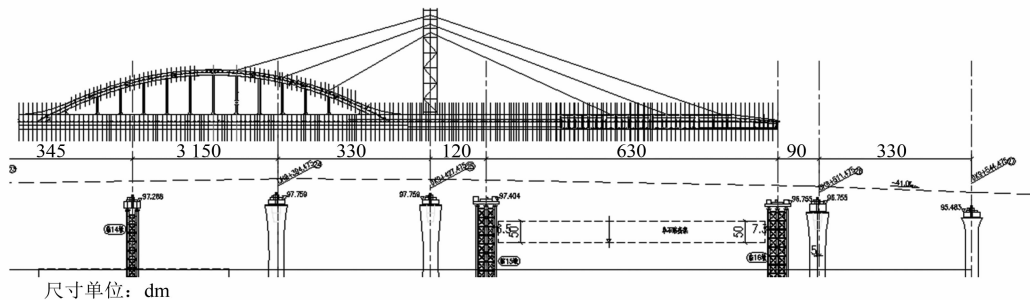


图 6 导梁前端最大下挠顶推阶段布置图

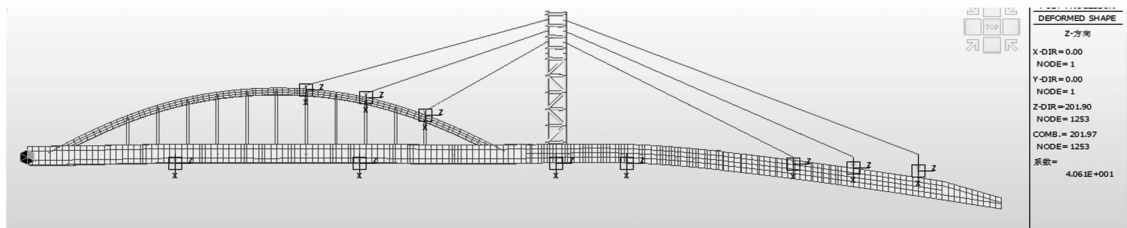


图 7 导梁前端最大挠度图

84 m 钢拱桥离开 L12 临时墩、悬臂最大 35 m 时,主梁后端最大下挠为 38.59 mm。该顶推阶段布

置图如图 8 所示。此时主梁后端最大挠度如图 9 所示。

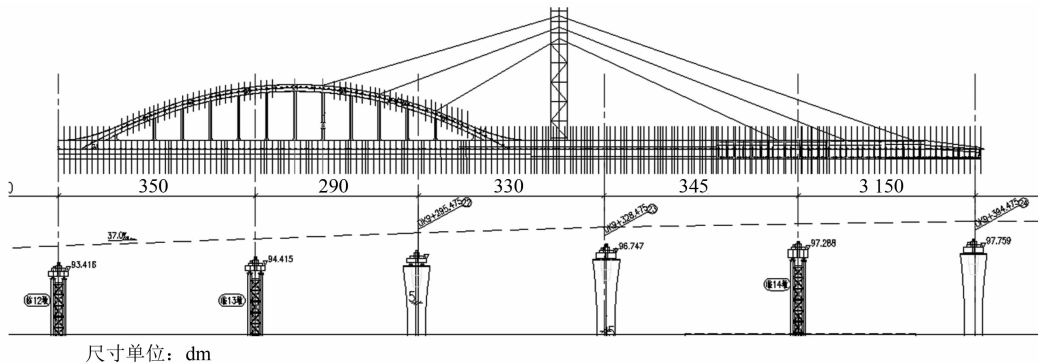


图 8 主梁后端最大下挠顶推阶段布置图

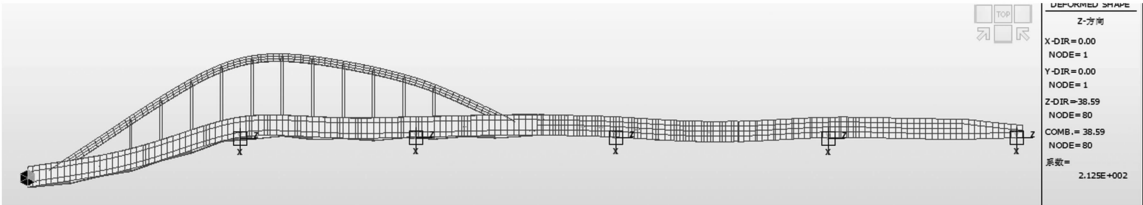


图 9 主梁后端最大挠度图

顶推方案“84 m 钢拱桥+33 m 钢格构梁+47 m 前导梁”增设临时索塔前后的主要计算结果如 1 所示。

表 1 顶推方案“84 m 钢拱桥+33 m 钢格构梁+47 m 前导梁”增设临时索塔前后计算结果

主梁计算项目	增设索塔	不增设索塔
上缘最大压应力/MPa	97.88	104.1
上缘最大拉应力/MPa	108.9	184
下缘最大压应力/MPa	114.8	205
下缘最大拉应力/MPa	83.8	131.3
导梁前端最大挠度/mm	202	-1 046.3
84 m 钢拱桥拱后端最大挠度/mm	-38.6	-62.5
拱肋最大拉应力/MPa	38.3	43.7
拱肋最大压应力/MPa	24.7	30
吊杆最大压力/kN	536.7	591.5
索塔最大拉应力/MPa	74.57	
拉索最大拉力/kN	983	
最大支反力/kN	4 591	4 895.5

由表 1 可见,设置索塔方案,可以有效改善钢梁受力和变形。但此处桥高 25 m,索塔高 24 m,顶推结构高近 50 m,索塔稳定性差,对索塔根部主梁影响大,施工难度大,需进一步优化。

3.3 采用“20 m 后导梁+84 m 钢拱桥+33 m 钢格构梁+32 m 前导梁+索塔”顶推

通过设置前后导梁降低索塔高度。优化后的方案拟采用“20 m 后导梁+84 m 钢拱桥+33 m 钢格构梁+32 m 前导梁”为一组顶推单元,临时索塔降至 15 m 高。临时索塔与拉索布置图如图 10 所示。

3.3.1 构造及计算模型

临时索塔设于 84 m 拱桥小纵梁与小横梁连接节点处,桁架塔柱采用 4 根 ϕ 800 mm (壁厚 16 mm) 圆钢管,顺桥向按间距 5 m、横桥向按间距 7 m 布置。拉索采用 ϕ 5 mm \times 91 根成品拉索。索塔端

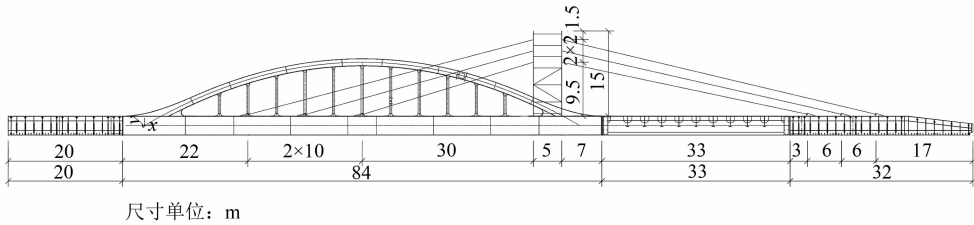


图 10 临时索塔与拉索布置图

采用冷铸墩头锚。前端吊耳设于导梁上,顺向间距 6 m,横向间距 12.93 m。尾端吊耳设于 84 m 简支钢箱拱梁小纵梁与小横梁连接节点处,纵向间距 10 m,横向间距 7 m。索塔及拉索布置图见图 10。

计算模型如图 11 所示。结构顶推采用 Midas

Civil 计算,模拟 87 个顶推过程。前导梁侧临时拉索由外侧向临时索塔一侧的临时拉索索力分别为 600 kN、450 kN 和 400 kN;84 m 简支拱一侧临时拉索,由外侧向索塔侧的拉索索力分别为 780 kN、630 kN 和 580 kN。

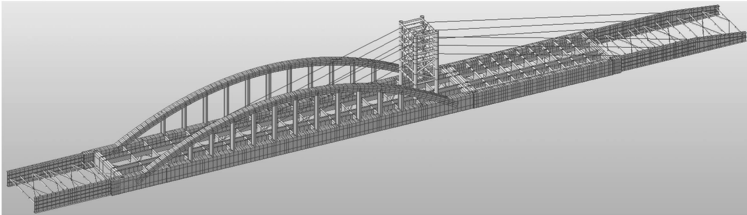


图 11 “20 m 后导梁+84 m 钢拱桥+33 m 钢格构梁+32 m 前导梁+索塔”顶推计算模型

3.3.2 计算结果

1) 主纵梁所受应力计算结果(见图 12):最不利施工阶段为最大悬臂 63 m 时,此时,主纵梁悬臂

根部上缘最大拉应力为 116.6 MPa、下缘最大压应力为 146.9 MPa、剪应力为 32.63 MPa。

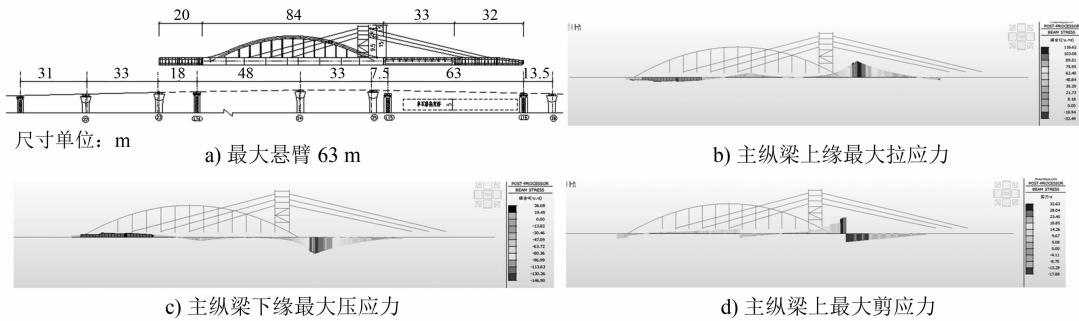


图 12 最不利施工阶段主纵梁所受应力计算结果

2) 横梁应力所受计算结果(见图 13):端横梁及小横梁最不利受力阶段为结构前端处于最大悬臂状态时,此时,临时索塔塔柱连接处横梁及与拉

索连接处横梁应力较大,横梁的最大拉应力为 148.0 MPa、最大压应力 149.9 MPa、剪应力为 27.4 MPa。

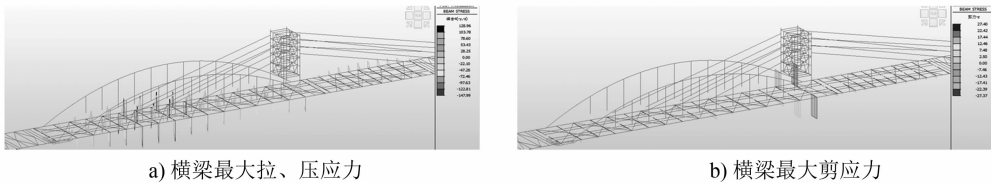


图 13 最不利施工阶段横梁所受应力计算结果

3) 小纵梁所受应力计算结果(见图 14):小纵梁受力最不利施工阶段为结构前端处于最大悬臂

状态时,此时,小纵梁最大拉应力 105.9 MPa、最大压应力 89.5 MPa、最大剪应力 10.39 MPa。

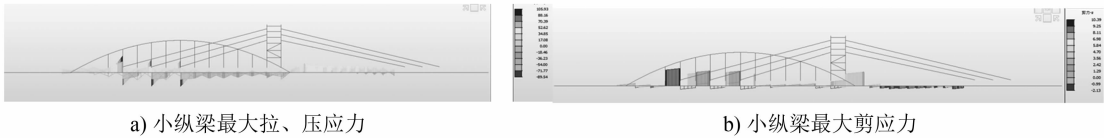


图 14 最不利施工阶段小纵梁所受应力计算结果

4) 前导梁所受应力计算结果(见图 15):前导梁及横联受力最不利施工阶段为前导梁处于最大

悬臂状态时,前导梁最大拉应力 153.0 MPa、最大压应力 158.2 MPa、剪应力 6.26 MPa。

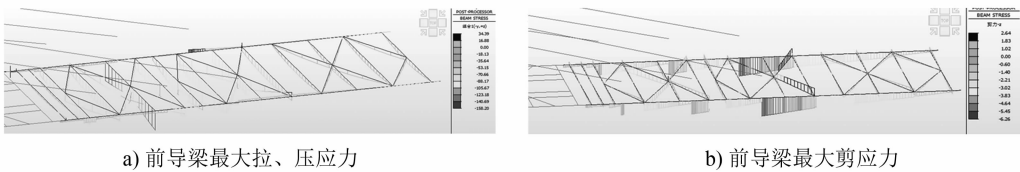


图 15 最不利施工阶段前导梁所受应力计算结果

5) 后导梁所受应力计算结果(见图 16):后导梁及导梁横联最不利受力阶段为临时索塔、拉索及前导梁已经拆除,33 m 简支梁前端过 26#墩 14.5 m

时,此时后导梁后端距离 24#墩 5.5 m,后导梁最大拉应力 75.84 MPa、最大压应力 75.80 MPa、剪应力 17.93 MPa。

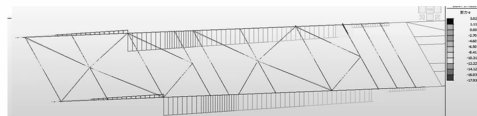
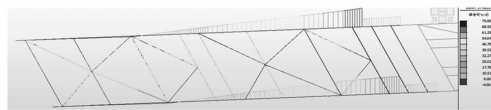
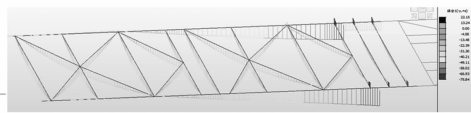
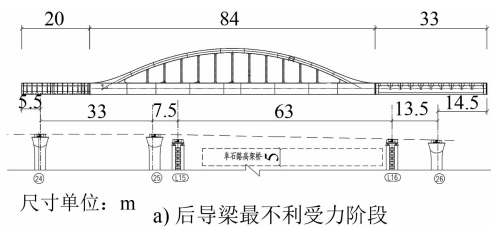
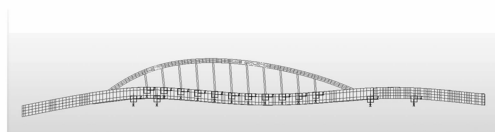


图 16 后导梁最不利受力阶段所受应力计算结果

6) 挠度计算结果(见图 17):前导梁前端悬臂为 63 m 时,最大下挠为 35.0 cm;后导梁后端悬臂为

33 m 时,最大下挠为 9.41 cm,此时索塔已拆除。



a) 前导梁最大挠度

b) 后导梁最大挠度

图 17 前导梁和后导梁挠度计算结果

7) 拱肋所受应力计算结果(见图 18~19):拱肋最大拉应力阶段为 33 m 梁距离 26#墩 7.5 m 时,最大值为 50.2 MPa;拱肋最大压应力阶段为前导梁

全部拆除、33 m 梁前端过 26#墩 20.5 m 时,最大值为 39.7 MPa;拱肋剪应力 7.86 MPa。

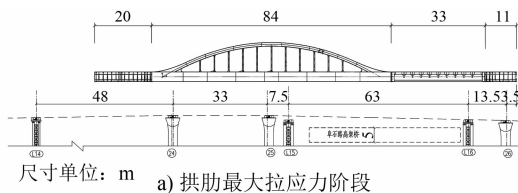


图 18 拱肋所受拉应力计算结果

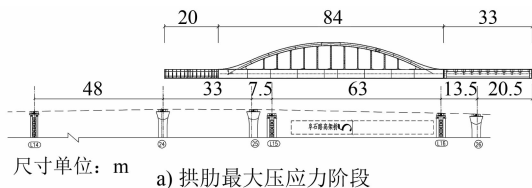


图 19 拱肋所受压应力计算结果

8) 吊杆受力情况计算结果(见图 20):吊杆最大压力为 817.7 kN,发生在后导梁悬臂 48 m 时。由于吊杆压力较大,因此顶推施工过程中须采取措施确保吊杆安全。

9) 临时索塔所受应力计算结果:临时索塔最大受力阶段为前导梁最大悬臂 63 m 时,此时,临时索塔所受最大拉应力为 93.9 MPa、最大压应力为 63.8 MPa、剪应力为 26.7 MPa。

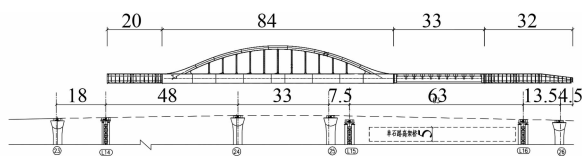


图 20 吊杆最大压力阶段

10) 临时拉索所受应力计算结果(见图 21):临时拉索最大受力阶段为前导梁最大悬臂 63 m 时,位于导梁侧 C1 拉索的索力最大,为 941.1 kN,相应的拉索应力最大。

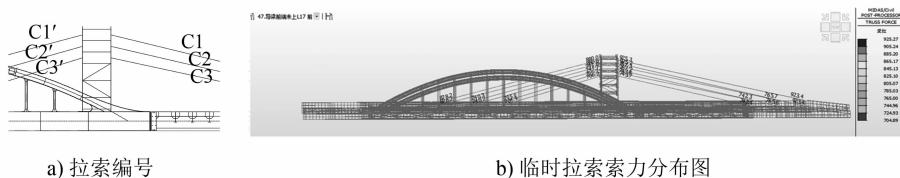


图 21 临时拉索所受应力计算结果

11) 稳定性验算:84 m 钢拱桥顶推阶段稳定性验算结果如表 2 所示。

表 2 不同最大悬臂状态下 84 m 钢拱桥顶推阶段
稳定性验算结果

施工阶段	倾覆弯矩 (kNm)	抗倾覆 弯矩/(kNm)	抗倾覆 安全系数
结构前端最大悬臂 63 m	108 030	432 666	4.0
结构后端最大悬臂 48 m	80 420	561 711	7.0

由上述计算结果可知,采用优化后的“20 m 后导梁+84 m 钢拱桥+33 m 钢格构梁+32 m 前导梁+15 m 高索塔”的顶推施工方案,可极大地减小主梁大悬臂工况下的变形和应力,且导梁、索塔等临时措施构造在各个顶推阶段均能满足受力、变形要求,能够有效保证了工程安全。

4 钢拱桥大悬臂顶推施工保障措施

顶推施工过程中,钢拱桥受力体系不断变化,为了保证钢拱桥结构安全,必须采取一些必要的构造或辅助保障措施。

1) 临时索塔与钢桥连接构造措施:塔柱设在钢拱桥纵横梁相交处,为满足索塔构造、受力要求,该节点位置需加大、加强,与索塔用法兰盘栓接;拉索采用吊耳与主梁栓接,顶推完成后拆除临时索塔和吊耳。临时塔柱与主梁连接方式如图 22 所示。临时拉索与主梁连接方式如图 23 所示。

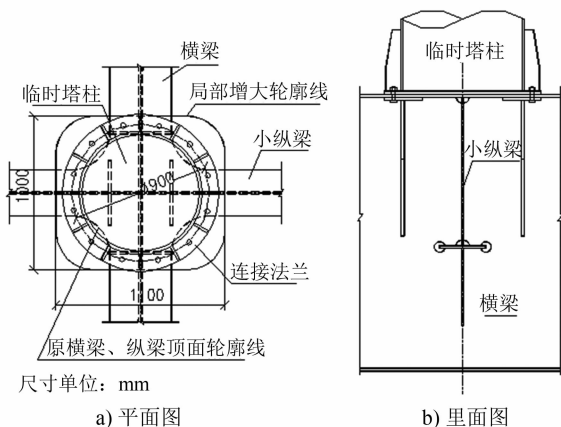


图 22 临时塔柱与主梁连接图

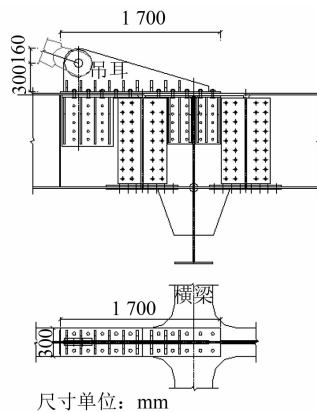


图 23 临时拉索与主梁连接图

2) 刚性吊杆加固措施:吊杆采用镂空工字型钢,为受拉构件,在顶推过程中,因体系不断转换,吊杆也在受拉或受压中不断变化。为保证吊杆不承受过大压力,防止其产生不可恢复的变形,在吊杆周围设置纵横撑。刚性吊杆加固措施如图 24 所示。

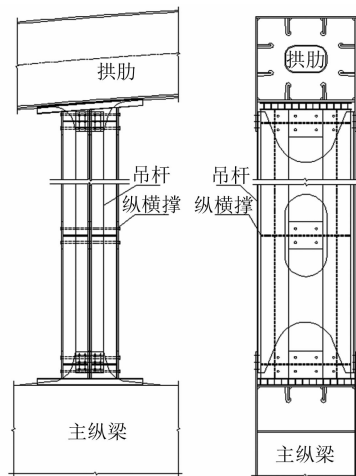


图 24 刚性吊杆加固措施图

3) 严格控制索力施加、拆除时间:索塔设置在钢拱桥纵横梁上,为柔性基础,为减小索塔受力、变形对永久结构的不利影响,需严格控制索力施加、拆除节点。经设计研究,导梁跨阜石路高架悬臂 10.5 m 时施加索力,顶推过 63 m 最大悬臂 2 m 后

(下转第 116 页)

3 结论

1) 高速列车在实际运行过程中,轮轨材料微观表面之间存在复杂形变,在位移载荷和材料表面摩擦系数影响下,轮轨切向接触阻尼都会受一定的影响。轮轨切向阻尼损耗因子随着法向位移载荷和摩擦系数的增大而减少,而轮轨切向接触阻尼随之逐渐增大;且当摩擦系数大于 0.3 时,轮轨间切向接触阻尼损耗因子和轮轨切向阻尼都趋于稳定状态。这一数值可为实际的工程提供一定的参考。

2) 车轮表面粗糙度对轮轨切向接触阻尼损耗因子影响甚微,而轮轨切向接触阻尼随着车轮表面粗糙度的增大先增大后减少。不同车轮表面硬度值条件下,轮轨切向阻尼损耗因子与轮轨切向接触阻尼的变化趋势却正好相反,这主要是轮轨切向接触阻尼虽然受轮轨切向接触阻尼损耗因子的影响,但切向接触刚度对其影响也不容忽视。

3) 列车运行不同里程时,轮轨间切向接触刚度发生了改变,运行里程 2.5 万 km 之前,轮轨切向接触阻尼随着运行里程增大而增大,运行里程在 2.5~7.5 万 km 之前,轮轨切向接触阻尼随着运行里程增大而减少,之后又增大。这是因为运行里程增加,车轮表面磨损,表面粗糙度和硬度值逐渐减小,轮轨材料微观形面发生改变。随着高速列车速度的

提高和服役时间的延长,考虑轮轨间微观接触特性是必然的选择,为安全运行提供保障。

参考文献

- [1] WANG Q. Measurement of contact stiffness of steel plates with various machined surfaces[D]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2008.
- [2] 张学良. 机械结合面动态特性及应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [3] CHEN W, DENG X. Structural damping caused by micro-slip along frictional interfaces[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 47(8): 191-211.
- [4] 赵宏林, 丁庆新, 曾鸣, 等. 机床结合部特性的理论解析及应用[J]. 机械工程学报, 2008(12): 208.
- [5] 李小彭, 王伟, 赵米鹊, 等. 考虑摩擦因素影响的结合面切向接触阻尼分形预估模型及其仿真[J]. 机械工程学报, 2012(23): 46.
- [6] 肖乾, 方姣. 高速轮轨粗糙表面法向和切向接触刚度研究[J]. 润滑与密封, 2018(2): 31.
- [7] 王南山, 张学良, 兰国生, 等. 临界接触参数连续的粗糙表面法向接触刚度弹塑性分形模型[J]. 振动与冲击, 2014(9): 72.
- [8] 田红亮, 方子帆, 朱大林. 固定接触界面切向静弹性刚度问题研究[J]. 应用力学学报, 2011(5): 458.
- [9] 牛作证, 张学良, 温淑花, 等. 结合面切向接触刚度三维分形模型[J]. 太原科技大学学报, 2013(5): 361.

(收稿日期: 2019-09-17)

(上接第 110 页)

拆除索塔, 效果最好。

4) 曲线顶推纠偏措施: 直线大跨度钢梁在曲线半径为 1 500 m 的曲线上顶推行进, 步履式千斤顶与钢梁的相对位置不断偏离, 需及时纠偏。通过在步履顶上设置鞍座(可转动 3% 的角度), 或者减小单次顶推距离从而减小纠偏距离来实现纠偏。

5) 纵坡调整措施: 顶推行程位于 37‰ 上坡和 41‰ 下坡上, 纵坡较大, 因此, 顶推过程中导梁前端上翘高度较高, 落梁困难。为此, 采取在顶推梁体后端加减调高垫块、不间断调整梁体竖向角度的措施; 为避免垫块调整高度较大、失稳, 采取抬高顶推梁体、减小纵坡、到位后落梁的措施。

6) 施工监控措施: 在关键点位布置监测点, 采用无线振弦测试系统对钢梁顶推各阶段的位移、挠度及应力进行监测, 监测结果及时反馈到电脑上, 可动态监控梁体顶进状态。

5 结语

S1 线跨越阜石路高架等构筑物, 地形复杂, 布跨和施工困难。结合中低速磁浮轨排模数布跨和伸缩节最大 40 mm 的要求, 采用 84 m 钢拱桥、步履式顶推施工。该桥钢结构为世界低速磁浮线路中跨度最大的钢结构。确定了和 33 m 钢梁临时焊接, 加设前后导梁、临时索塔的最优顶推方案, 并制定了施工保障措施, 有效解决了中低速磁浮钢拱桥大悬臂顶推受力复杂、变形大的问题。

参考文献

- [1] 高荣峰. 小半径曲线混凝土连续梁步履式顶推施工技术[J]. 施工技术, 2017(11): 25.
- [2] 顾乾岗. 兰州深安黄河大桥钢拱梁步履式顶推施工技术[J]. 世界桥梁, 2014(5): 22.
- [3] 李磊. 单孔 84 m 双线简支钢桁梁大悬臂顶推施工设计[J]. 铁道建筑技术, 2016(增刊 1): 129.

(收稿日期: 2021-07-06)